

複数の砂および地震動に対する 土の変形特性試験法の適用性に関する検討

山本 昌徳¹・山内 泰知²・井澤 淳³

¹ 正会員 修士 (工学) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: yamamoto.masanori.21@rtri.or.jp

² 正会員 修士 (工学) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: yamauchi.yasutomo.82@rtri.or.jp

³ 正会員 博士 (工学) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: izawa.jun.06@rtri.or.jp

筆者らは地盤の逐次非線形解析に用いる変形特性を適切に把握するため、従来の土の変形特性試験法(従来法)の問題を極力とり除いた変形特性試験法(RTRI法)を提案している。本稿ではより実務的な手法(簡易RTRI法)および大ひずみ領域の変形特性をより適切に把握可能な手法(単調載荷法)を検討し、その適用性について複数の単粒径の砂および継続時間の異なる地震動を用いて検証した。その結果、密度の低い砂の場合、RTRI法および簡易RTRI法は概ね適切に変位を評価できることを確認した。一方、密度の高い砂の場合、試験法によらず概ね適切に変位を評価できることを確認した。また、継続時間が長い海溝型地震動に対してもRTRI法および簡易RTRI法は概ね適切に評価可能であることを確認した。さらに単調載荷法はRTRI法および簡易RTRI法より高い精度で応答評価可能であることを確認した。

Key Words: soil deformation properties test, ground response analysis,
hybrid ground response analysis, unique particle sand, duration of earthquake

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計において、地盤の地震時挙動を適切に評価することは重要であり、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(以降、耐震標準)¹⁾では、地盤の地震時挙動を逐次非線形解析により評価することを推奨している。また、幅広いひずみレベルで精度よく土の非線形性を表現可能なGHE-Sモデルが提案されている²⁾。筆者らは、地盤の動的解析に使用する土の変形特性を適切に把握するため、繰返し載荷に伴う水圧上昇の影響を極力抑えた変形特性試験を提案し、適用性を確認している³⁾。しかし、同手法は変形特性のみを把握する場合、従来の試験法と比べ試験本数が増えるなど、実務的に適用する際に課題であった。また、これまで検討している変形特性試験法で得られる変形特性は最大ひずみ1~2%程度までであり、それ以上の変形特性はモデルを外挿しているため、実際の土とは異なる応答評価となる可能性がある。

本稿では、変形特性試験の試験本数を削減した、より実務的な試験法を示すとともに、複数の砂および継続時間の異なる地震動に対する試験法の適用性を検討した。また、大ひずみ領域の変形特性を適切に把握するため、単調載荷試験結果を用いた試験法を示すとともに、地盤応答解析を実施してその適用性を検討した。

2. 試験本数を削減した試験法による変形特性の評価手法

(1) 土の変形特性試験

従来の土の変形特性試験(以降、従来法)は、繰返し載荷に伴う水圧上昇の影響により、大ひずみ領域の剛性を過小評価する課題が指摘されている⁴⁾。筆者らは繰返しによる水圧上昇を極力抑えた変形特性試験(以下、RTRI法)を提案している³⁾。

RTRI法は図-1(a), (b)に示す「1回繰返し段階載荷試験(以降、段階載荷試験)」および「一定ひずみ振幅繰返し

載荷試験（以降、定ひずみ試験）の試験であり、図-1(c)に示すようなせん断剛性比とせん断ひずみの関係 ($G/G_{max} \sim \gamma$ 関係) および各ステージ・各サイクルのせん断応力とせん断ひずみの関係 ($\tau \sim \gamma$ 関係) を得る。RTRI 法は、断層型地震動と海溝型振動のように継続時間の異なる地震動に対して、適用する定ひずみ試験結果のサイクル数を変えることで適切な剛性低下を考慮可能な枠組みとしている。なお、既往の検討により豊浦砂（相対密度 $D_r=60, 80\%$ ）に対する断層型、海溝型地震動への適用性を確認している^{3,5)}。また、RTRI 法はエネルギー法を用いた液化化判定が実施可能である³⁾。一方で、試験本数が4本必要であり、変形特性のみを把握したい場合は従来法よりコストが高く、実務的に適用する際に課題がある。図-1(c)には段階載荷試験、定ひずみ試験とともに従来法の試験結果を併せて示しているが、従来法と定ひずみ試験結果の2サイクル目を適用したRTRI法（以降、RTRI法@2cycle）は、0.5%を超える大ひずみ領域の剛性が顕著に低下している。一方、段階載荷試験結果は定ひずみ試験結果の1サイクル目を適用したRTRI法（以降、RTRI法@1cycle）と同様、剛性低下が抑えられている。

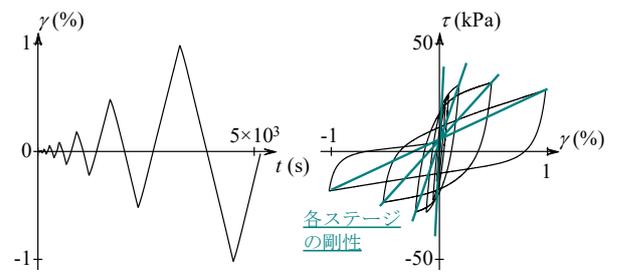
そこで本稿では、従来法およびRTRI法に加え、段階載荷試験1本のみから変形特性を算定する手法（以降簡易RTRI法）に対しても適用性を検討した。

(2) 種々の砂で得られる変形特性

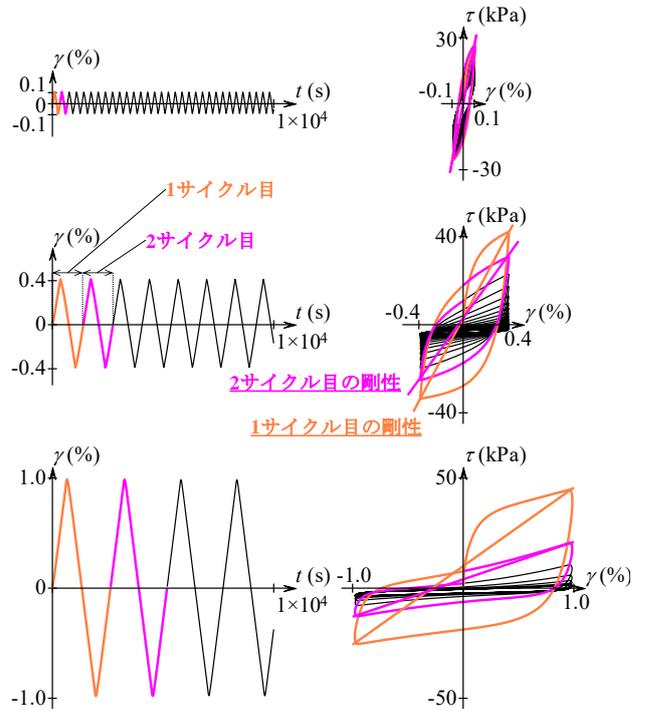
本稿では、剛性低下に対する水圧上昇の影響が大きいと考えられる単粒度の砂に対して平均粒径 D_{50} および相対密度 D_r を変えて適用性を検討した。本稿で用いた土質材料は珪砂8号、豊浦砂、珪砂6号である。図-2に各土質材料の粒度分布を示す。なお、粘性土は剛性低下に与える水圧上昇の影響が小さいと考えられるため、本稿の検討対象外とした。

図-3に珪砂8号、豊浦砂、珪砂6号の $D_r=60\%$ 、豊浦砂 $D_r=80\%$ に対して実施した異なる土の変形特性試験（従来法、RTRI法、簡易RTRI法）から得られた $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係および $\tau \sim \gamma$ 関係、変形特性把握時点の過剰間隙水圧比とせん断ひずみの関係 ($\Delta u/\sigma'_c \sim \gamma$ 関係) を示す。RTRI法は定ひずみ試験結果の1サイクル目、2サイクル目を適用した2ケースを示す。また、それぞれの $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係、 $\tau \sim \gamma$ 関係等に関してGHE-Sモデル³⁾でフィッティングした結果を重ねて示す。GHE-Sモデルのパラメータは反復Shor'sアルゴリズム⁶⁾を用いた最適化手法により求めた。最適化手法の詳細は山内ら⁷⁾を参照された。

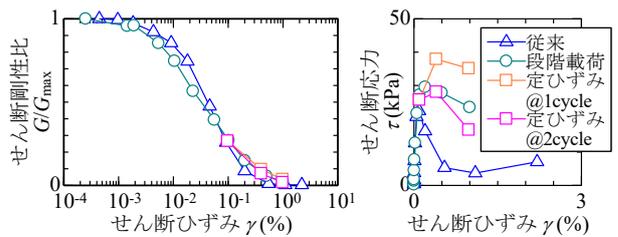
図-3(a), (b)に示す珪砂8号および豊浦砂 $D_r=60\%$ の場合、従来法の大ひずみ領域における剛性低下が簡易RTRI法やRTRI法@1cycleより顕著であることが分かる。こ



(a) 1回繰返し段階載荷試験（段階載荷試験）



(b) 一定ひずみ振幅繰返し載荷試験（定ひずみ試験）



(c) 試験結果から得られる $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係、 $\tau \sim \gamma$ 関係

図-1 RTRI法の載荷方法および試験結果から得られる $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係、 $\tau \sim \gamma$ 関係

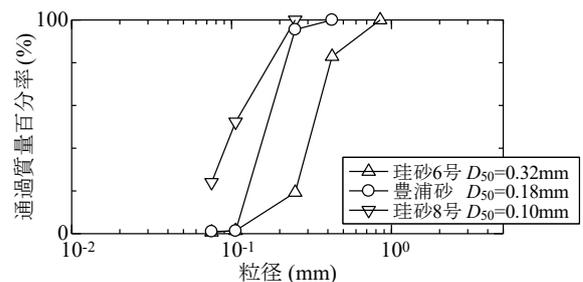


図-2 検討対象の土質材料

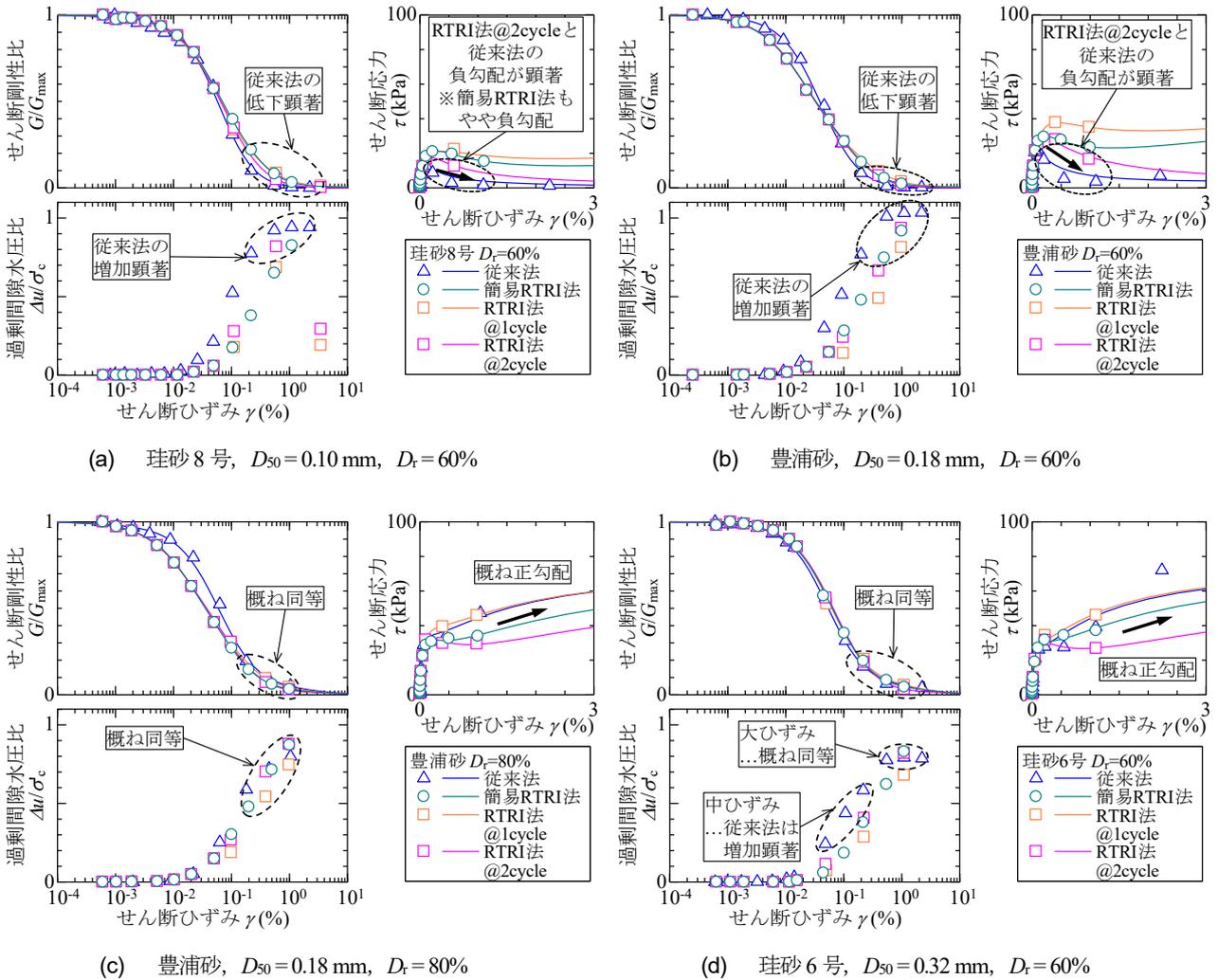


図-3 従来法, RTRI法, 簡易RTRI法で得られる変形特性およびGHE-Sモデルによるフィッティング結果

これは、これらの試料は密度が低く、各ステージの繰返し回数の多い従来法の場合、各ステージの繰返し载荷により発生する過剰間隙水圧が、簡易RTRI法やRTRI法@1cycleより大きいためであると考えられる。また、RTRI法@2cycleの過剰間隙水圧も大きく発生し、剛性を過小評価している。そのため、 τ - γ 関係を見ると、従来法やRTRI法@2cycleでは大ひずみ領域で τ が低下し続ける負勾配の傾向が顕著である。ただし、珪砂8号の $D_r=60\%$ の場合は、簡易RTRI法もやや負勾配の傾向を示している。

図-3(c), (d)の豊浦砂 $D_r=80\%$ および珪砂6号 $D_r=60\%$ は、大ひずみ領域の剛性低下の程度が4つの変形特性ともに概ね同程度あり、 τ - γ 関係はいずれも概ね正勾配を示している。密度が高い豊浦砂 $D_r=80\%$ は、大ひずみ領域においても過剰間隙水圧に与える繰返し载荷の影響が小さかったと考えられる。一方、珪砂6号 $D_r=60\%$ は大ひずみ領域では何らかの要因で過剰間隙水圧が全ての試験で同程度であり、剛性低下の程度に違いが生じなかったが、中ひずみ程度では従来法の過剰間隙水圧がRTRI

法@1cycleや簡易RTRI法より大きいため、簡易RTRI法またはRTRI法@1cycleを用いるのが適切と考えられる。

3. 各試験法の適用性

(1) 断層型地震動に対する適用性

図-4(a)に示す地層構造を有する地盤に対してGHE-Sモデルを用いた1次元の地盤応答解析(以降、動的解析)およびハイブリッド地盤応答試験(以降、ハイブリッド試験)³⁾を実施した。深度4~6mの層を適用性の検討対象層とし、動的解析では2(2)節で得られるパラメータを用いてモデル化を行い、ハイブリッド地盤応答試験では単純せん断試験対象層とした。ただし、断層型地震動は継続時間が短く繰返しによる剛性低下の程度が小さいと考えられるため、RTRI法は定ひずみ試験の1サイクル目の結果を適用した変形特性(RTRI法@1cycle)のみを検討対象とした。なお、その他の層は動的解析およびハイブリッド試験ともにGHE-Sモデルの標準パラメータ⁸⁾を用い、レーリー減衰は福島・翠川⁹⁾を参考に地盤の固

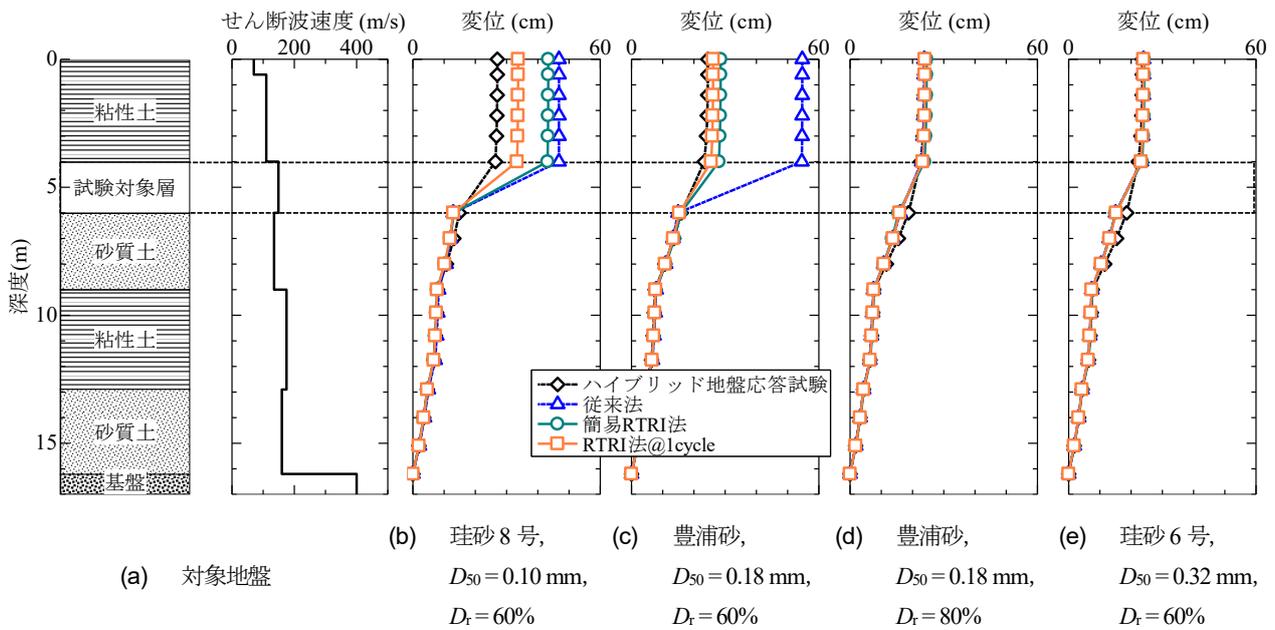


図-4 従来法, RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法で得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の比較 (スペクトルII地震動)

有周期から設定した ($\alpha=1.0$, $\beta=0.0020$)。基盤には $\rho=2.0 \text{ g/cm}^3$, $V_s=400 \text{ m/s}$ 相当の粘性境界を設置し, 耐震標準のスペクトルII地震動 (G1 地盤) ¹⁾ を入力した。

図-4(b)~(e)に珪砂8号, 豊浦砂, 珪砂6号の $D_r=60\%$, 豊浦砂 $D_r=80\%$ を用いて得られた動的解析結果およびハイブリッド試験結果の最大応答変位分布を示す。豊浦砂 $D_r=60\%$ は, 深度4~6mの層以浅で従来法の変位がRTRI法@1cycleと簡易RTRI法の変位はハイブリッド試験結果と概ね同程度となっている。一方, 豊浦砂 $D_r=80\%$ および珪砂6号 $D_r=60\%$ は各種試験法から得られる変形特性によらず, いずれの変位分布も一致し, ハイブリッド地盤応答試験結果と整合している。密度の低い砂では繰り返し载荷により大ひずみ領域で剛性が低下しやすいため, 従来法は応答変位が過大評価となり, 繰り返し载荷の少ないRTRI法@1cycleや簡易RTRI法はより適切な応答評価できたと考えられる。珪砂8号 $D_r=60\%$ は, 豊浦砂 $D_r=60\%$ と同様に従来法の変位が最も過大評価しているが, 簡易RTRI法もRTRI法@1cycleより過大評価しており, RTRI法@1cycleが最もハイブリッド試験と整合する結果となった。これは, 図-3(a)で珪砂8号 $D_r=60\%$ は, 簡易RTRI法においても $\tau\sim\gamma$ 関係が大ひずみ領域でやや負勾配の傾向を示していたことと関連があると考えられる。一方, 図-3(c), (d)の豊浦砂 $D_r=80\%$ および珪砂6号 $D_r=60\%$ は, いずれも $\tau\sim\gamma$ 関係が大ひずみ領域で正勾配となっている。負勾配を持つ場合は, RTRI法@1cycleの方がより適切だが, 簡易RTRI法でも安全側に評価可能である。

(2) 海溝型地震動に対する適用性

本検討には3(1)節と同じ地盤を用い, 海溝型地震動として耐震標準のスペクトルI地震動 (G1 地盤) ¹⁾ を入力した。なお, 海溝型地震動は繰り返し回数が多いため, 繰り返し载荷に伴う水圧上昇の影響による剛性低下を考慮する必要があると考えられるため, RTRI法@1cycleに加え, RTRI法@2cycleの変形特性を用いた動的解析も実施した。

図-5に, 豊浦砂 $D_r=60\%$ に対してスペクトルI地震動を入力した場合の従来法, RTRI法@1cycle, 簡易RTRI法から得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の最大値応答分布を示す。スペクトルII地震動を入力した図-4(c)と同様, 深度4~6mの層以浅で従来法の変位がRTRI法@1cycleおよび簡易RTRI法より大きくなっており, RTRI法@1cycleおよび簡易RTRI法の変位はハイブリッド試験結果と概ね同程度となっている。

図-6に図-5と同一試料, 同一地震動に対してRTRI法@1cycleおよびRTRI法@2cycleから得られる変形特性を用いた動的解析とハイブリッド試験結果の最大応答変位分布を示す。RTRI法@2cycleの変位は, RTRI法@1cycleより大きく, 定ひずみ試験の2サイクル目の結果を適用すると土の剛性を過小評価する結果となる。そのため, スペクトルI地震動に関しては繰り返し回数が多いが, 剛性低下は想定より小さいことが分かる。

図-7に豊浦砂 $D_r=60\%$ に対してスペクトルI, II地震動を入力したハイブリッド試験結果の試験対象層 (深度4~6m) の各種応答時刻歴を示す。図中に最大せん断ひ

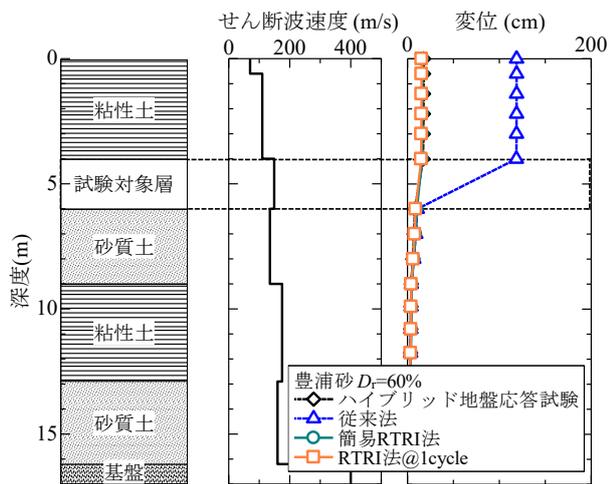


図-5 従来法, RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法で得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の比較 (スペクトル I 地震動, 豊浦砂 $D_r = 60\%$)

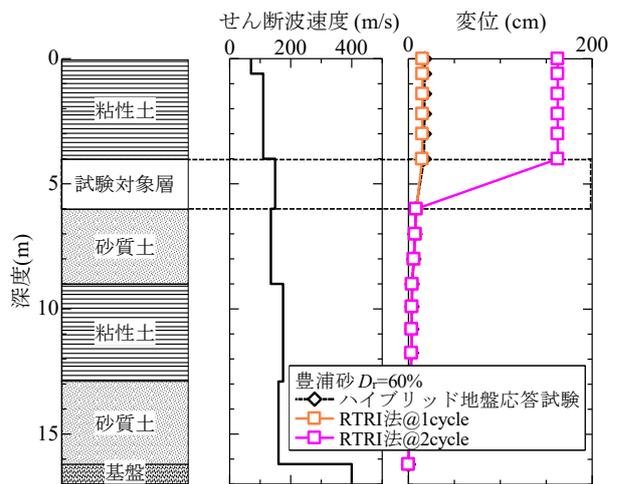
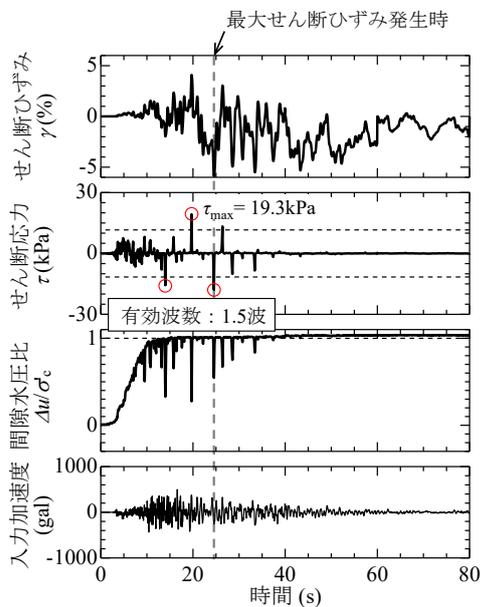
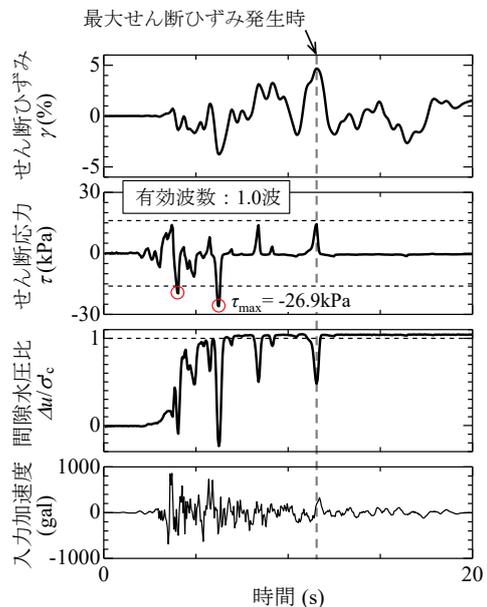


図-6 RTRI 法@1cycle, RTRI 法@2cycle で得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の比較 (スペクトル I 地震動, 豊浦砂 $D_r = 60\%$)



(a) スペクトル I 地震動



(b) スペクトル II 地震動

図-7 スペクトル I, II 地震動に対するハイブリッド試験の試験対象における各種応答時刻歴および最大せん断ひずみ発生以前の有効波数 (スペクトル I 地震動, 豊浦砂 $D_r = 60\%$)

ずみ発生時点を示しているが、スペクトル I, II のどちらも供試体が $\Delta u/\sigma'_c = 1.0$ に達し完全に液状化した後となっている。また、最大せん断ひずみ発生以前の 0.5% を超えるひずみは複数回発生しており、繰返しによる水圧の上昇に伴う剛性低下は生じていると考えられる。ただし、最大せん断ひずみ発生時はサイクリックモビリティで $\Delta u/\sigma'_c = 0.5$ 程度まで低下し、剛性が回復している。そのため、最大せん断ひずみ発生時の剛性に対するそれまでに入力された繰返し载荷の影響は大きくないと考えられる。

また、スペクトル I 地震動で剛性低下が想定より小さい要因について山崎ら¹⁰⁾の提案する「有効波数」の概念を用いて考察する。有効波数は、せん断応力時刻歴波形の内、最大せん断応力の 6 割を超えるピークを持つ波の数の半分と定義され、液状化の発生に影響を与える波数とされている。したがって、水圧変動に影響を与える波数と考えることができ、変形特性の水圧依存にも影響を与えると考えられる。図-7 には各試験結果の最大せん断応力の 6 割を超えるピークを○印で示しているが、スペクトル I 地震動では 1.5 波とスペクトル II 地震動の 1.0 波

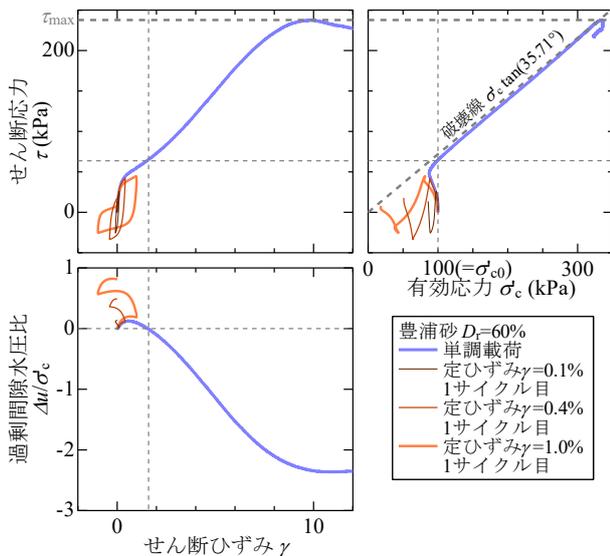


図-8 単調荷重試験および定ひずみ試験結果 (豊浦砂, $D_r=60\%$)

と同程度の有効波数であることが分かる。このことから、スペクトル I 地震動は土の変形特性に影響を与えるレベルの繰返し回数がスペクトル II と同程度であったと考えられ、繰返し荷重の少ない RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法から得られる変形特性を用いた動的解析の応答変位がハイブリッド試験結果と整合する結果となったと考えられる。スペクトル I 地震動以外の海溝型地震動についても有効波数が 1.5 波程度であれば、RTRI 法@1cycle または簡易 RTRI 法が適用可能であると考えられる。ただし、有効波数が多い場合は別途繰返しの影響を考慮する必要がある。

4. 大ひずみレベルの変形特性を把握可能な試験法による変形特性の評価手法

(1) 単調荷重試験結果を用いた変形特性の評価手法

3 章で耐震標準のスペクトル I, II 地震動 \ddot{u} に対しては、継続時間によらず繰返し回数が 1 回程度で得られる剛性を適用した変形特性 (RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法) がハイブリッド試験結果と概ね整合すること分かった。そのため、通常は内部摩擦角および粘着力を把握するために実施される単調荷重試験の結果から得られる変形特性 (以降、単調荷重法) も適用可能と考えられる。図-8 に豊浦砂 $D_r=60\%$ の単調荷重試験結果を示す。単調荷重試験結果から 10% 程度で最大せん断応力 τ_{max} に達し定常状態に至っていることが分かる。また、 $\gamma=5\%$ 以降は $\Delta u/\sigma'_{c0} < 0$ となり正のダイレイタンスが顕著である。図には定ひずみ試験の 1 サイクル目の結果と併せて示すが、単調荷重試験結果は 20% 程度の大ひずみレベルまで荷重しており、従来の変形特性試験や段階荷重試験、定

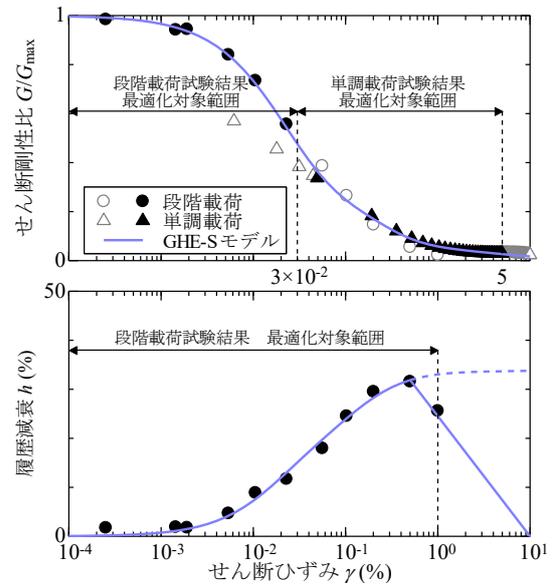


図-9 単調荷重法に適用する段階荷重試験, 単調荷重試験結果および GHE-S モデルフィッティング

ひずみ試験と比べ幅広いひずみレベルの変形特性が把握できることが分かる。なお本稿で用いた単調荷重試験結果は非排水条件、初期有効拘束圧 σ'_{c0} は各変形特性試験と同様 100 kPa で実施した。

図-9 に単調荷重法で得られる変形特性を示す。単調荷重試験は微小ひずみ領域の剛性の精度が低いため、本稿では G_{max} および $\gamma=0.03\%$ 以下の $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係は段階荷重試験結果を用いることとした。また、単調荷重試験結果では履歴減衰 h が得られないため段階荷重試験結果の $h \sim \gamma$ 関係を適用した。なお、GHE-S モデルでフィッティングする際、最適化 η の指標として $\tau \sim \gamma$ 関係の両軸をそれぞれせん断強度 τ_f 、基準ひずみ γ_f で正規化した $\tau/\tau_f \sim \gamma/\gamma_f$ 関係を用いる。通常、 τ_f は式(1)から求める。

$$\tau_f = \sigma'_c \tan \phi' \quad (1)$$

ただし、図-8 の有効応力経路 ($\tau \sim \sigma'_c$ 関係) に示すように単調荷重試験結果は正のダイレイタンスが生じることで σ'_c が初期有効拘束圧 σ'_{c0} より大きくなっているため、式(1)で得られる τ_f より最大せん断応力 τ_{max} が大きくなる。そのため、本稿では τ を τ_{max} で正規化することとした。以上の方法により豊浦砂 $D_r=60\%$ に対して GHE-S モデルでフィッティングした結果を図-10 に示す。なお、比較のため RTRI 法@1cycle および簡易 RTRI 法に対してフィッティングした結果, τ_{max} , 式(1)で得られる τ_f のラインを重ねて示す。本稿で用いた単調荷重試験結果は $\gamma=10\%$ 程度で τ_{max} に至るが、GHE-S モデルは $\gamma \rightarrow \infty$ で τ_{max} に漸近するような関数を用いるため単調荷重試験結果と GHE-S モデルの挙動に乖離が生じる。この乖離が最適化の誤差評価に影響しないよう、本検討では最適化の評価

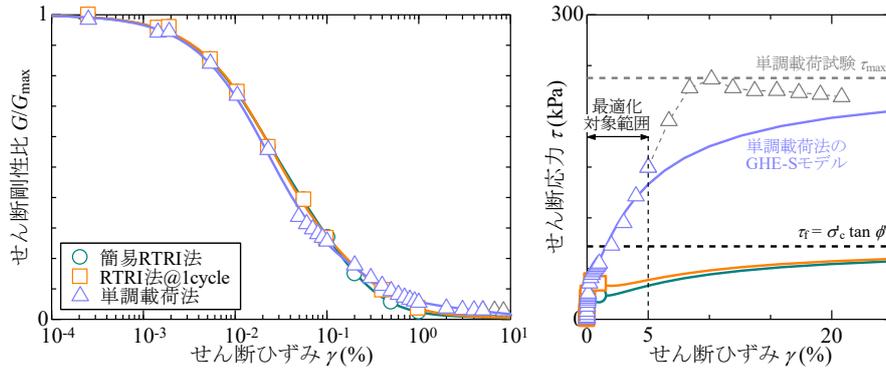


図-10 RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法, 単調載荷法で得られる変形特性および GHE-S モデルのフィッティング結果 (豊浦砂, $D_r = 60\%$)

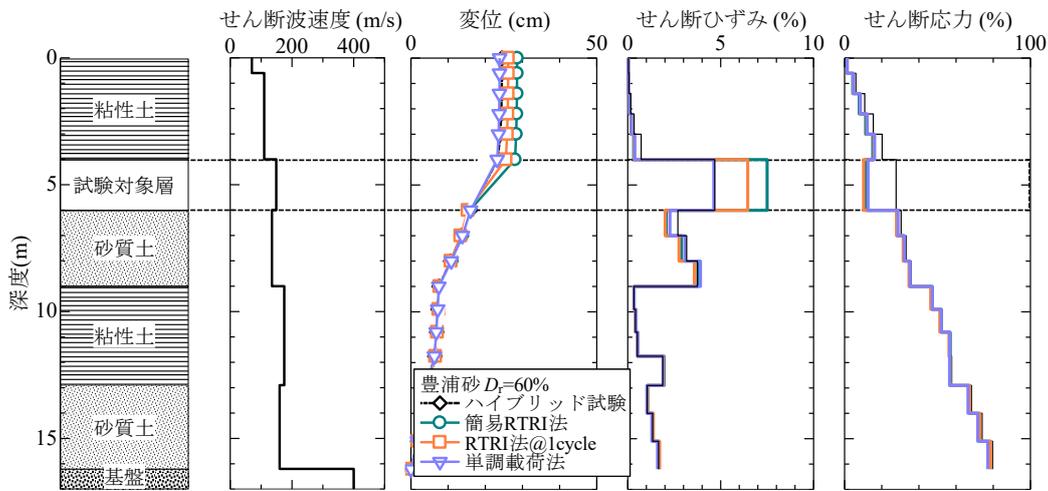


図-11 RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法, 単調載荷法で得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の深度分布 (スペクトル II 地震動, 豊浦砂 $D_r = 60\%$)

範囲を $\gamma = 5\%$ 以下とした。

(2) 変形特性の適用性

図-11 に豊浦砂 $D_r = 60\%$ に対してスペクトル II 地震動を入力した場合の RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法, 単調載荷法から得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の最大値応答分布を示す。単調載荷法が RTRI 法@1cycle よりハイブリッド試験結果と整合する結果となっている。RTRI 法および簡易 RTRI 法の試験対象層の最大せん断ひずみは 6~8% 程度と変形特性試験結果以上のひずみレベルまで応答評価していることが分かる。一方, 単調載荷法は 5% 以下の試験結果を用いており, 最大せん断ひずみが 5% 以内となっているため, 大きいひずみレベルに対しても精度の高い応答評価ができたと考えられる。また, 単調載荷法は $\tau \sim \gamma$ 関係が正勾配であることも要因の一つと考えられる。

図-12 に各種応答時刻歴を示す。単調載荷法のせん断ひずみは $\Delta u/\sigma_c = 1.0$ に達し完全に液状化した後 ($t = 7\text{ s}$) までハイブリッド試験結果整合しているが, RTRI 法

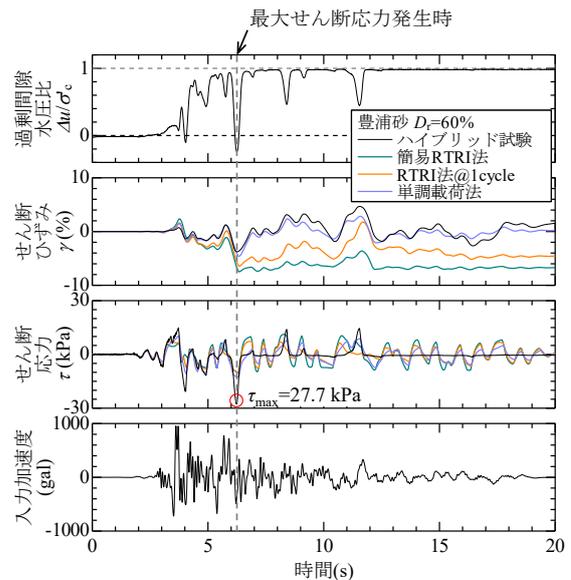


図-12 RTRI 法@1cycle, 簡易 RTRI 法, 単調載荷法で得られる変形特性を用いた動的解析およびハイブリッド試験結果の時刻歴 (スペクトル I 地震動, 豊浦砂 $D_r = 60\%$)

@1cycle および簡易 RTRI 法は最大せん断応力発生時 ($t = 6$ s) 以降ひずみが残留し、適切な応答評価ができていない。また、RTRI 法@1cycle および簡易 RTRI 法のせん断応力は完全に液状化した後に過大評価している。一方、単調載荷法は完全に液状化した後も概ね整合している。これは単調載荷法がより大きいひずみレベルまで変形特性を把握でき、大ひずみレベルまで適切にモデル化が可能であること、単調載荷試験は段階載荷試験、定ひずみ試験結果と比べ繰返し載荷に伴う水圧上昇の影響が小さいためと考えられる。ただし、単調載荷法のせん断応力は RTRI 法や簡易 RTRI 法と同程度であり、過小評価する結果となった。ハイブリッド試験結果は最大せん断応力発生時に $\Delta u/\sigma_c < 0$ とサイクリックモビリティが顕著であるため、せん断応力が一時的に急増したと考えられるが、本稿は全応力解析のため有効応力の変動による剛性変化を考慮できないためと考えられる。

5. まとめ

本稿では、筆者らが提案している地盤の動的解析のための変形特性試験法 (RTRI 法) に対してより実務的な手法 (簡易 RTRI 法) および大ひずみレベルの変形特性を把握可能な手法 (単調載荷法) を検討し、その適用性について検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 相対密度の低い砂の場合、繰返し載荷により過剰間隙水圧が蓄積しやすく、従来の変形特性試験法は、大ひずみ領域での剛性を過小評価し、動的解析においては変位を過大評価する傾向にある。
- (2) 異なる試験法より得られる変形特性を用いた動的解析を実施した結果、定ひずみ試験結果の 1 サイクル目を適用した RTRI 法が最も高い精度で地盤変位を評価できた。また、簡易 RTRI 法は応力ひずみ関係で負勾配が生じる場合に地盤変位をやや過大評価する可能性があるが、安全側の評価が可能である。
- (3) 密度の高い砂の場合、試験手法によらず変形特性は概ね一致し、いずれの試験法でも適切な応答結果が得られる。
- (4) 継続時間が長く繰返し回数が多い海溝型地震動においても、有効波数が 1 程度である場合、簡易 RTRI 法および定ひずみ試験結果の 1 サイクル目を適用した RTRI 法は適切な応答結果が得られる。
- (5) 大ひずみレベルまで適切にモデル化可能な単調載荷法で得られる変形特性を用いた動的解析は RTRI 法および簡易 RTRI 法より精度の高い応答評価が可

能である。

山内ら¹¹⁾は、RTRI 法の大ひずみレベルの変形特性を無視してパラメータフィッティングした場合が最もハイブリッド試験結果と整合することを指摘しており、本稿で単調載荷試験結果を組み合わせた変形特性について検討した結果と整合する。RTRI 法や簡易 RTRI 法は従来の変形特性試験と比較し精度の高い変形特性試験であるが、大ひずみレベルに適用する変形特性に関しては課題があり、今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012.
- 2) 室野剛隆，野上雄太：S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力 ~ ひずみ関係，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，2006.
- 3) 鈴木聡，井澤淳，豊岡亮洋，小島謙一：耐震設計における適切な表層地盤応答評価法の構築，総研報告，Vol. 32, No. 9, 2018.
- 4) 吉田望，三上武子：時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を，地盤工学会誌，2010.
- 5) 井澤淳，山本昌徳，神澤拓，小島謙一：海溝型地震を対象とした地盤応答解析に用いる土の変形特性に関する検討，第 54 回地震工学研究発表会，2019.
- 6) Kappel, F. and Kuntsevich, A. V.: An implementation of Shor's r-algorithm, Computational Optimization and Applications, Vol. 15, No. 2, pp. 193-206, 2000.
- 7) 山内泰知，山本昌徳，井澤淳：地盤の動的解析における変形特性パラメータの設定手法に関する一考察，第 24 回橋梁等の耐震設計シンポジウム，2021.
- 8) 野上雄太，室野剛隆：S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集，2009.
- 9) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q-1 値とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，第 460 号，pp. 37-46, 1994.
- 10) 佐々真志，山崎浩之，後藤佑介：地震動波形と継続時間の双方を考慮した新たな液状化予測判定法とその検証，土木学会論文集 B3, Vol. 69, No. 2, I_143-I_148, 2013.
- 11) 山内泰知，山本昌徳，井澤淳：地盤の動的解析における変形特性パラメータの特徴と設定手法に関する一考察，第 41 回地震工学研究発表会 (投稿中)，2021.

THE STUDY ON APPLICABILITY OF THE TESTING METHODS FOR DERFOMATION PROPERTIES OF SANDS TO SANDS AND EARTHQUAKES

Masanori YAMAMOTO, Yasutomo YAMAUCHI and Jun IZAWA

The authors have proposed a new testing method (the RTRI method) for determining appropriate deformation properties of soils used for time-domain nonlinear seismic ground response analysis, which is conducted to determine seismic actions applied to a structure in seismic design. In this paper, the authors proposed a more practical method (the simple RTRI method) and verified applicability of the Simple RTRI method by comparing the results of analysis with the hybrid ground response analysis at some sands and some earthquakes. The results showed that the simple RTRI method is practical method because the deformation properties assessed by this method appropriately estimated the maximum displacement distribution. In addition, the results showed that a new testing method combined with 1 cycle shear test and monotonic shear test, gave the most appropriate deformation properties.